стного действия цемента и ВКС была отвергнута. Однако установлено, что ВКС в цементных бетонах является добавкой, улучшающей структуру и прочность бетона, и ее применение эффективно и целесообразно при изготовлении мелкозернистых бетонов при малых расходах цемента. В дальнейшем необходимо разработать практические рекомендации по применению ВКС в качестве добавки и апробировать разработанные составы при производстве бетонных и железобетонных изделий.

1.Пивинский Ю.Е. Керамические вяжущие и керамобетоны. – М.: Металлургия, 1990. – 269 с.

2.Кучерявченко Т.В. Помол исходного материала кварцевых суспензий // Материалы к 44-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов – МОК’44. – Одесса: Астропринт, 2005. – С.149-150.

3.Золотов М.С., Рапина Т.В. Использование помольного оборудования для измельчения исходного продукта высококонцентрированных кварцевых суспензий // Науковий вісник будівництва. Вип.37. – Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2006. – С.109-114.

4.Золотов М.С., Рапина Т.В., Лапшин А.С. Влияние способа измельчения исходного материала на основные параметры получения кварцевых суспензий // Науковий вісник будівництва. Вип.40. – Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2007. – С.100-107.

5.Пивинский Ю.Е. Получение и свойства строительных керамобетонов // Строительные материалы. – 1993. – № 4. – С.25-29.

6.Кириленник В.П. Кремнебетон. – К.: Будівельник, 1975. – 248 с.

Получено 21.02.2008

УДК 539.3 : 624.21

А.А.ЧУПРЫНИН, канд. техн. наук, Р.АББАСИ
Харьковская национальная академия городского хозяйства

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Приводится постановка и метод решения геометрически и физически нелинейных задач деформирования неоднородных стержневых конструкций и проанализированы численные алгоритмы реализации метода конечных элементов (МКЭ).

В настоящее время в строительстве широко используются элементы, расчетная схема которых соответствует стержневым конструкциям (каркасы, фермы, подъемные механизмы). Широкое использование современных материалов обуславливает разработку новых методов расчетов, учитывающих неоднородность материала и нелинейность его свойств. Учет нелинейных факторов позволяет более адекватно смоделировать процессы деформирования конструкций.

Условия эксплуатации строительных конструкций в современных условиях характеризуются высокими внешними воздействиями, что часто приводит к тому, что материал начинает работать за пределами упругости. Кроме того, обеспечение высокой надежности и долговечности элементов конструкций, при одновременном уменьшении времени проектирования и сокращении расходов, требует создания современных методов моделирования и расчетов. В настоящее время базовым методом численного моделирования напряженно-деформированного состояния является МКЭ. При этом использование современной компьютерной техники позволяет находить оптимальные конструктивные решения.

В настоящее время достаточно хорошо исследовано деформирование стержневых конструкций, получены аналитические и численные решения для отдельных элементов конструкций. Однако эти методы оказываются неприемлемыми при рассмотрении сложных конструкций, состоящих из большого числа элементов. Исследование всей конструкции, используя современные конечно-элементные пакеты, имеет свои недостатки, в частности высокую стоимость и трудоемкость расчетов.

Нелинейные задачи деформирования неоднородных конструкций принадлежат к числу наиболее сложных в современной механике.

Общая схема МКЭ рассмотрена в работах [1, 2]. Далее используем принятые в них основные обозначения и допущения и известные соотношения для изгиба балок, уточнив геометрические зависимости за счет нелинейных составляющих деформаций нейтральной оси балки.

Выберем одномерный балочный элемент с двумя узлами. Предположим, что продольные перемещения (u) распределены по длине элемента линейно (координата x), а поперечные (v, w) определяются полиномом третьей степени по длине элемента. В результате получим десять неизвестных постоянных, которые можно определить по узловым значениям перемещений и углов поворота:

$$u=\alpha_1+\alpha_2 x\,;$$
$$v=\alpha_3+\alpha_4 x+\alpha_5 x^2+\alpha_6 x^3\,; \qquad (1)$$
$$w=\alpha_7+\alpha_8 x+\alpha_9 x^2+\alpha_{10} x^3\,.$$

Деформации, согласно общей схеме МКЭ, определяются следующим образом:

$$[\varepsilon]=[B]\,[U], \qquad (2)$$

где $[\varepsilon]$ – вектор деформаций; $[B]$ – матрица деформаций элемента; $[\varepsilon]$ – вектор перемещений, компонентами которого являются перемещения и углы поворота в узлах элемента.

Полученные в матричной форме геометрические зависимости позволяют записать физические соотношения в следующем виде:

$$[\sigma]=[D][\varepsilon]-[\sigma_V]-[\sigma_N]-[\sigma_0],$$

или, с учетом (2):

$$[\sigma]=[D][B][U]-[\sigma_V]-[\sigma_N]-[\sigma_0], \qquad (3)$$

где $[\sigma]$ – вектор напряжений; $[D]$ – матрица напряжений элемента; $[\sigma_V],[\sigma_N],[\sigma_0]$ – компоненты напряжений, вызванные объемными (температурными) деформациями, нелинейными составляющими упругих деформаций и необратимыми (пластичность и ползучесть) деформациями соответственно.

Далее, следуя схеме МКЭ, разрешающее уравнение можно записать в виде:

$$[F]=[K][U]-[F]_T-[F]_N-[F]_0, \qquad (4)$$

где $[F]$ – вектор узловых сил; $[F]_T,[F]_N,[F]_0$ – дополнительные силы в узлах, обусловленные соответствующими составляющими напряжений; $[K]$ – матрица жесткости элемента, которая определяется соотношением

$$[K]=\iiint_V [B]^T[D][B]\,dv. \qquad (5)$$

В рассмотренной постановке основные особенности исходной и приобретаемой при деформировании неоднородности и нелинейности свойств материала стержневой конструкции включены в вектор нагрузок и учитываются слагаемыми $[F]_T,[F]_N,[F]_0$. Вместе с тем неоднородность упругих свойств внутри элемента сохраняется и должна быть учтена при вычислении матриц жесткости каждого элемента.

При численной реализации МКЭ для неоднородных балок вычисление объемных интегралов для определения вектора нагрузки и матрицы жесткости выполняется численным методом Гаусса по длине элемента и здесь важен выбор гауссовых точек интегрирования. Это определяется следующими соображениями. Формулы интегрирования Гаусса с n точками верны для полиномов степени $2n–1$ [3]. Анализ структуры выражений матриц жесткости показывает, что максимальный порядок компонентов в числителях выражений для их элементов достигает 7. Это значит, что квадратура Гаусса с четырьмя точками уже обеспечивает практически точное вычисление матриц жесткости.

Интегрирование по площади элемента целесообразней производить по формулам Ньютона-Котеса. Эти формулы удобны тем, что значения подынтегральных функций в них вычисляются в точках, расположенных на равном расстоянии друг от друга, кроме того, в этом методе для вычислений используются точки максимально удаленные от нейтральной оси. Это оказывается важным при моделировании процессов ползучести и пластичности, так как именно в этих точках наибольшие напряжения и, следовательно, более интенсивно происходит процесс накопления необратимых деформаций.

Система уравнений (4) является нелинейной, так как матрица жесткости сохраняет нелинейные составляющие деформаций. Для линеаризации используется метод последовательных приближений, в котором при каждой следующей итерации происходит уточнение нелинейных слагаемых.

В случае, когда рассматривается задача ползучести, напряженно-деформированное состояние с течением времени будет меняться, а на каждом шаге по времени разрешается система уравнений с постоянными матрицами жесткости.

На каждой итерации (шаге по времени), проводится преобразование матриц жесткости конечных элементов. В этом случае матрицы связи деформаций и узловых перемещений представляются в виде суммы двух – соответствующих линейным и нелинейным слагаемым в геометрических соотношениях.

Второе-четвертое слагаемые в правой части системы будем рассматривать как дополнительные узловые силы, определенные из решения на предшествующем шаге времени (итерации). Для решения основной разрешающей системы уравнений сформулированной задачи в виде системы уравнений применяется метод Холецкого, который используется для решения линейных алгебраических уравнений с симметричной, ленточной, положительно определенной матрицей.

Таким образом, существенным отличием описанного нами метода моделирования напряженно-деформированного состояния неоднородных стержневых конструкций от известных публикаций по данной теме является малоисследованная область применения МКЭ для неоднородных конструкций с учетом их нелинейного деформирования. При этом неоднородность может быть как начальная (многослойные элементы, неоднородные материалы), так и приобретенная (неравномерный нагрев, пластичность, ползучесть).

В качестве примера рассмотрено деформирование бетонной балки длиной 10 м, прямоугольного сечения под действием сосредоточенной силы, приложенной на консоли или посередине пролета двухопорной шарнирноопертой балки. В таблице приведены прогибы балки в месте приложения силы: 1) прогибы, полученные в геометрически линейной постановке задачи от нормированной силы F^* – силы, которая вызывает прогиб, равный высоте сечения; прогибы в геометрически нелинейной постановке для 2) консольной и 3) двухопорной балки соответственно. В таблице показаны усредненные значения для различной высоты и ширины сечения, которые варьировались в пределах 10-20 см.

Нормированная сила F^*	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16
Линейная постановка	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16
Консольная балка	0	0,02	0,04	0,059	0,078	0,975	0,113	0,130	0,144
Двухопорная балка	0	0,02	0,04	0,058	0,076	0,943	0,111	0,123	0,136

Анализируя приведенные результаты расчетов, можно сделать вывод, что в балке, прогибы которой не превышают 0,1-0,12 высоты сечения, решения в геометрически линейной и нелинейной постановке отличаются несущественно (разница меньше 5%), при увеличении прогибов (выделенная зона) расхождение растет.

1.Чупрынин А.А., Аббаси Р. Численная реализация метода конечных элементов в задачах статики и динамики стержневых конструкций // Тезисы докл. XXXIII науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХНАГХ. Ч.2. – Харьков: ХНАГХ, 2006. – С.138.

2.Усюкин В.И. Строительная механика конструкций космической техники. – М.: Машиностроение, 1988. – 292 с.

3.Бреславский В.Е., Чупрынин А.А. Численная реализация МКЭ в задачах статики и динамики неоднородных тонких оболочек // Динамика и прочность машин. Вып.55. – Харьков: ХГПУ, 1997. – С.102-108.

Получено 12.02.2008

УДК 691.58 : 668.3

Л.Н.ШУТЕНКО, д-р техн. наук, М.С.ЗОЛОТОВ, канд. техн. наук, Р.Б.ТКАЧЕНКО
Харьковская национальная академия городского хозяйства

ДЕФОРМАТИВНОСТЬ АНКЕРОВКИ АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ КЛАССА А500С АКРИЛОВЫМИ КЛЕЯМИ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

Приводятся результаты экспериментов по определению деформативности анкеровки арматурных стержней класса А500С в бетон акриловыми клеями. Рассматривается